

УДК 504.5:629.5

ПРИМЕНЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТНЫХ МЕТОДОВ В АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ МОНИТОРИНГА ВОДООБМЕНА РЕЧНОГО СУДНА С ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДОЙ

Шаронов Илья Сергеевич¹, курсант
e-mail: fndrt@yandex.ru

¹ Нижегородское речное училище имени И.П. Кулибина, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье рассматривается проблема низкой достоверности традиционных детерминированных систем экологического мониторинга водных объектов, связанная с высоким уровнем ложных тревог (до 80%) и инструментальными погрешностями датчиков (до 30%). Предложен подход к повышению надёжности контроля сбросов судов путём внедрения в автоматизированные системы вероятностных методов обработки данных. На основе натурных измерений на шести озёрах Нижнего Новгорода проведена апробация схемы Бернулли, байесовского подхода, метода Монте-Карло и фильтра Калмана. Выявлены корреляционные связи между профилями загрязнения, проведена количественная оценка рисков превышения нормативов. Показано, что внедрение данных алгоритмов позволяет снизить количество ложных срабатываний на 60–80%.

Ключевые слова: экологический мониторинг, вероятностные методы, байесовская фильтрация, фильтр Калмана, метод Монте-Карло, водообмен судна, качество воды, ложные тревоги.

APPLICATION OF PROBABILISTIC METHODS IN THE AUTOMATED SYSTEM FOR MONITORING WATER EXCHANGE OF AN INLAND VESSEL WITH THE ENVIRONMENT

Ilya S. Sharonov¹, Cadet
e-mail: fndrt@yandex.ru

¹ Nizhny Novgorod River College named after I.P. Kulibin, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article addresses the problem of low reliability of traditional deterministic environmental monitoring systems for water bodies, associated with a high false alarm rate (up to 80%) and instrumental sensor errors (up to 30%). An approach is proposed to improve the reliability of discharge control by introducing probabilistic data processing methods into automated systems. Based on field measurements at six lakes in Nizhny Novgorod, the Bernoulli scheme, Bayesian approach, Monte Carlo method, and Kalman filter were tested. Correlations between pollution profiles were identified, and a quantitative risk assessment of exceeding standards was carried out. The implementation of these algorithms is shown to reduce false alarms by 60–80%.

Keywords: environmental monitoring, probabilistic methods, Bayesian filtering, Kalman filter, Monte Carlo method, vessel water exchange, water quality, false alarms.

Введение

Ужесточение международных требований к предотвращению загрязнения с судов, регламентированных Конвенцией МАРПОЛ 73/78 [1], ставит перед судовладельцами и разработчиками оборудования задачу повышения точности и достоверности бортовых систем мониторинга. Традиционные автоматизированные системы контроля сбросов работают по детерминированному принципу: при превышении установленного порогового значения концентрации вещества формируется сигнал тревоги или блокируется сброс. Однако данный подход обладает рядом фундаментальных недостатков. Во-первых, он не учитывает естественную погрешность измерительных приборов, которая для ряда судовых датчиков может достигать 30%. Во-вторых, игнорируется априорная информация о низкой вероятности возникновения аварийного загрязнения в нормальных условиях эксплуатации. Как следствие, экипаж сталкивается с парадоксальной ситуацией: до 80% сигналов тревоги являются ложными, что ведёт к привыканию персонала и, наоборот, увеличивает риск пропуска реального инцидента [2].

Целью данной работы является обоснование внедрения в архитектуру судовой автоматизированной системы мониторинга водообмена вероятностных методов обработки измерительной информации для повышения достоверности выявления аномалий. В задачи исследования входила апробация алгоритмов Бернулли, Байеса, Монте-Карло и Калмана на реальных данных экологического мониторинга водных объектов.

Краткая история развития вероятностных методов

Якоб Бернулли (1654–1705) — швейцарский математик, профессор Базельского университета, один из основоположников теории вероятностей и вариационного исчисления. В своём фундаментальном труде «*Ars Conjectandi*» («Искусство предположений»), опубликованном посмертно в 1713 году, он сформулировал и доказал одну из важнейших предельных теорем — закон больших чисел (теорему Бернулли). Схема независимых испытаний с двумя исходами, носящая его имя, лежит в основе современного статистического контроля качества [3, 4].

Томас Байес (1702–1761) — английский математик и пресвитерианский священник, член Лондонского королевского общества. Основным трудом Байеса «*An Essay towards solving a Problem in the Doctrine of Chances*», содержащий знаменитую теорему, был опубликован посмертно в 1763 году. Теорема Байеса устанавливает математическую связь между априорной вероятностью гипотезы и её апостериорной вероятностью с учётом полученных наблюдений [2, 10].

Станислав Улам (1909–1984) и *Николас Метрополис* (1915–1999). Годом рождения метода Монте-Карло считается 1949 год, когда сотрудники Лос-Аламосской национальной лаборатории опубликовали статью, описывающую применение статистического моделирования для решения задач ядерной физики. Суть метода заключается в замене точного аналитического решения дифференциальных уравнений генерацией тысяч случайных сценариев с последующей оценкой распределения вероятностей [5].

Рудольф Калман (1930–2016) — американский инженер и математик венгерского происхождения, один из основателей современной теории управления. На рубеже 1958–1959 годов он разработал рекурсивный алгоритм оценки вектора состояния динамической системы по неполным и зашумлённым измерениям. Фильтр Калмана, в отличие от частотных фильтров Винера, работает во временной области и способен в реальном времени отделять полезный сигнал от инструментальных шумов и вибрационных помех [6].



Математическая справка о применяемых методах

Схема Бернулли. Если производится n независимых испытаний, в каждом из которых событие A может произойти с вероятностью p , то вероятность того, что событие произойдёт ровно k раз, определяется формулой Бернулли [7, 8]:

$$P_n(k) = C_n^k \cdot p^k \cdot (1 - p)^{n-k} \quad (1)$$

В контексте мониторинга это позволяет количественно оценить, является ли серия отклонений случайной флуктуацией или указывает на системное загрязнение.

Теорема Байеса. Позволяет пересчитать вероятность гипотезы H с учётом полученного свидетельства E [9, 10]:

$$P(H|E) = (P(E|H) * P(H))/P(E) \quad (2)$$

где $P(H)$ — априорная вероятность гипотезы, $P(E|H)$ — правдоподобие наблюдения E при условии истинности гипотезы, $P(E)$ — полная вероятность наблюдения.

Фильтр Калмана. Работает в два этапа: этап предсказания и этап коррекции. Алгоритм минимизирует среднеквадратичную ошибку оценки вектора состояния системы, используя матрицы ковариации шумов процесса и измерений [6].

Метод Монте-Карло. Основан на законе больших чисел: при достаточно большом количестве случайных испытаний N частота появления события A приближается к его истинной вероятности. В данной работе моделирование 10 000 виртуальных замеров позволило построить эмпирические распределения концентраций загрязнителей [5].

Объекты и методы исследования

В качестве объектов для апробации методики были выбраны шесть озёр, расположенных на территории Нижнего Новгорода: Мещерское, Бурнаковское, Светлоярское, Щёлковский хутор, Земснаряд и Автозаводское. Выбор данных объектов обусловлен их различным антропогенным воздействием и гидрохимическим режимом, что позволяет моделировать различные сценарии судового водообмена.

Исследование включало три цикла измерений по семи параметрам: концентрация нитратов, уровень радиационного фона, общая минерализация (TDS), водородный показатель (pH), электропроводность и напряжённость магнитного поля. Измерения проводились сертифицированными приборами с известными паспортными погрешностями.

Результаты и их обсуждение

Анализ дисперсии и корреляции. Первичный анализ показал высокую пространственную неоднородность данных. Наибольшая нестабильность зафиксирована для озера Щёлковский хутор по показателю минерализации (дисперсия $\sigma^2 = 49,33$) и для озера Светлоярское по нитратам ($\sigma^2 = 6,33$). Это свидетельствует о том, что даже при средних значениях параметров, находящихся в пределах нормы, в данных точках возможны резкие скачки концентраций, аналогичные залповым сбросам с судов.

Корреляционный анализ выявил практически функциональную связь между парами озёр: «Автозаводское – Земснаряд» ($r = 0,998$) и «Светлоярское – Бурнаковское» ($r = 0,999$). Это указывает на общие источники поступления примесей и идентичную структуру загрязнения, несмотря на различие в абсолютных значениях концентраций.

Применение вероятностных алгоритмов. Применение схемы Бернулли позволило дифференцировать водные объекты по частоте аномалий. Для озера Земснаряд вероятность получения аномального замера нитратов равна 0, в то время как для Щёлковского хутора

она составляет 83%. Это означает, что при судовом мониторинге сбросов с вероятностью 83% требуется повторный, более детальный лабораторный анализ пробы из данного района.

Байесовский подход был апробирован на примере контроля электропроводности озера Бурнаковское. При априорной вероятности соответствия норме $P(H) = 0,95$ и последовательности измерений (норма, аномалия, норма), после получения аномального показания апостериорная вероятность нормы осталась на уровне 98,9%. Математически это демонстрирует, что одиночный выброс с высокой долей вероятности вызван погрешностью датчика или кратковременной флуктуацией, а не системным нарушением. Это позволяет отсекают 60–80% ложных тревог, характерных для пороговых систем [2].

Моделирование методом Монте-Карло (10 000 итераций) дало количественную оценку экологического риска. Установлено, что для озёр Мещерское и Щёлковский хутор риск превышения ПДК по нитратам и минерализации составляет 100% (вероятность события $P \approx 1$). Для озера Светлоярское риск превышения по нитратам составляет менее 0,1%. Таким образом, метод позволяет не просто констатировать факт превышения, а прогнозировать вероятность опасного события [5].

Применение фильтра Калмана к ряду измерений радиационного фона озера Земснаряд (9, 11, 9 мкР/ч) позволило сгладить резкий выброс. Итоговая последовательность оценок фильтра (9,0 → 9,5 → 9,3 мкР/ч) оказалась существенно ближе к истинному значению, подавив вероятную инструментальную или вибрационную помеху. В судовых условиях это особенно актуально для компенсации шумов газоанализаторов, работающих в условиях вибрации главных двигателей [6].

Практические рекомендации и выводы

На основе проведённого вероятностного анализа предложена классификация водных объектов по режиму мониторинга:

1. Хронически загрязнённые (Мещерское, Щёлковский хутор) — требуют постоянного автоматического контроля.
2. Периодически нестабильные (Светлоярское, Земснаряд) — требуют учащённого мониторинга в определённые гидрологические фазы.
3. Условно чистые (Бурнаковское, Автозаводское) — достаточно эпизодического контроля.

Для внедрения на судах речного флота рекомендуется интеграция в штатные контроллеры сброса балластных и льяльных вод программных модулей, реализующих:

- байесовскую фильтрацию для подавления ложных срабатываний сигнализации;
- схему Бернулли для управления выборочным контролем смены водных масс;
- метод Монте-Карло для проектной оценки рисков системы очистки;
- фильтр Калмана для онлайн-сглаживания сигналов датчиков мутности и нефтепродуктов.

Реализация данных алгоритмов трансформирует судовую систему экологического мониторинга из пассивного порогового устройства в активный инструмент поддержки принятия решений судоводителем.

Список литературы

1. Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов (МАРПОЛ 73/78). — СПб.: ЦНИИМФ, 2022. — 456 с.
2. Смит Р. С. Обнаружение разладки случайных процессов методами байесовского анализа // Автоматика и телемеханика. — 2020. — № 5. — С. 45–58.
3. Бернулли Я. О законе больших чисел / пер. с лат. Я. В. Успенского; под ред. Ю. В. Прохорова. — М.: Наука, 1986. — 176 с.



4. Колмогоров А. Н. Основные понятия теории вероятностей. — 2-е изд. — М.: Фазис, 1998. — 120 с.
5. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method // Journal of the American Statistical Association. — 1949. — Vol. 44, № 247. — P. 335–341.
6. Kalman R. E. A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems // Journal of Basic Engineering. — 1960. — Vol. 82, № 1. — P. 35–45.
7. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика: учебник для вузов. — 12-е изд. — М.: Юрайт, 2023. — 479 с.
8. Вентцель Е. С., Овчаров Л. А. Теория вероятностей и её инженерные приложения: учебное пособие. — 5-е изд., стер. — М.: КНОРУС, 2016. — 480 с.
9. Пугачёв В. С., Синицын И. Н. Стохастические дифференциальные системы. Анализ и фильтрация. — 2-е изд., доп. — М.: Наука, 1990. — 632 с.
10. Ширяев А. Н. Вероятность: в 2 кн. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: МЦНМО, 2007. — Кн. 1. — 552 с.

